HL-3 装置 ECRH 天线系统研制

郑万欣 叶际若 陈罡宇 黄梅
（核工业西南物理研究院 成都 6100415）

摘要 根据 HL-3 装置电子回旋共振加热(ECRH)系统的需求，完成了天线系统的设计与研制，并对天线进行了测试与安装。HL-3 装置 ECRH 天线系统由三个天线组成，包含一个中平面天线和两个上斜天线，三个天线位于装置弱场侧的同一扇段，可协同完成加热、新经典撕裂模(NTM)控制等功能。目前已经完成其中两个天线的设计、制造和测试，另外一个天线完成了发射光路的设计。测试结果表明，中平面天线和上斜一号天线控制精确、快速，达到了装置实验使用的要求。

关键词 HL-3 装置；天线；电子回旋共振加热
中图分类号 TL62+4
DOI:

Design and development of ECRH launcher system on HL-3 tokamak

Zheng Wanxin Ye Jiruo Chen Gangyu Huang Mei
(*Southwestern Institute of Physics, Chengdu, 610041, China*)

Abstract **[Background]**: Electron cyclotron resonance heating (ECRH) is an important heating and plasma current control method for the HL-3 tokamak. Microwave inject into plasma through the launcher, which is an important part of the ECRH system. **[Purpose]**: Design and test the ECRH launcher system of the HL-3 tokamak. **[Methods]**: Overall planning was carried out for the launcher system. Designed the transmission path and structure of the launcher. Simulated and calculated the effect of microwave injection. Tested the transmission angle and rotation speed of the launcher, and calibrated the rotation angle of the launcher. **[Results]**: The optical path design of the No. 2 upper launcher has been completed. The full range response time of the equatorial launcher is less than 90ms; The full range response time of the No. 1 upper launcher is less than 190ms. **[Conclusions]**: The optical path design of the No. 2 upper launcher meets the requirements. The control of the equatorial launcher and the No. 1 upper launcher is precise and fast, meeting the requirements for experimental use of the tokamak.

Key words HL-3 tokamak, Launcher, ECRH

在磁约束可控核聚变研究中，电子回旋共振加热因波的吸收效率高、沉积的局域性好，与等离子体耦合效率高以及天线可远离等离子体等特点而广泛应用于等离子体加热、控制等离子体电流剖面、抑制 NTM 及辅助启动等[1-7]。HL-3 装置目前规划建设总功率为 9.5MW 的 ECRH 系统，3 套天线及相关辅助运行系统[8]，本文将详细介绍天线系统的设计与研制。

国家磁约束核聚变能发展研究专项（2022YFE03020002）；国家自然科学基金（U2267209）资助 National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFE03020002)；National Natural Science Foundation of China (Grant No. U2267209)
第一作者：郑万欣，女，1997 年 11 月，2023 年于核工业西南物理研究院获硕士学位，助理工程师，研究领域等离子体波加热技术 First author: Zheng Wanxin, female, November 1997, obtained a master's degree from the Southwest Institute of Physics in 2023, assistant engineer, plasma microwave heating technology
通讯作者：黄梅，四川省成都市双流区黄荆路 5 号，6100415，(028)82850399，hm@swip.ac.cn Corresponding author: Huang Mei, No. 5, Huangjing Road, Shuangliu District, Chengdu City, Sichuan Province, 6100415, (028) 82850399, hm@swip.ac.cn
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00

1 HL-3 装置 ECRH 系统

ECRH 系统由射频系统和辅助系统组成，其中射频系统主要包括回旋管、传输线和发射天线，辅助系统主要包括控制系统、微波参数测量、电源和冷却系统等[9]。根据 HL-3 装置运行参数[10]及实验研究需求[11]，HL-3 装置规划总功率为 9.5MW 的 ECRH 系统，其系统总体布局如图 1 所示。目前已研制了 7.5MW，包括 1 套 68GHz/500kW/1s、5 套 105GHz/1MW/3s 、2 套 140GHz/1MW/3s 系统，其余 2 套系统的频率需要在后期根据装置运行需求确定。

ECRH 系统的波源系统放置在与 HL-3 装置大厅相邻的波加热大厅，与波源相连的传输线穿过两个大厅之间墙壁上的过孔与集成在装置上的 3 套发射天线对接。阴极高压电源放置于整流厅，高压电缆通过地下管网铺设至波加热大厅。控制系统上位机放置在加热控制室，通过以太网实现与本地设备之间的通讯，在主控系统的管理下，统一控制运行 ECRH/ECCD 系统及监测系统运行状态[12]。

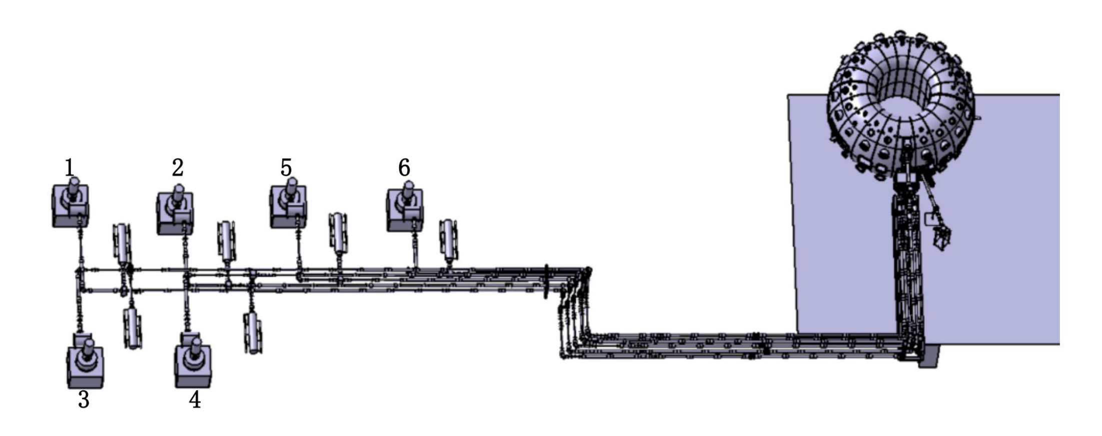


图 1 HL-3 装置 ECRH 系统总体布局
Fig.1 Launcher position

2 天线系统总体规划

HL-3 装置 ECRH 系统采用 68GHz、105GHz、140GHz 三种频率的回旋管，通过天线系统在不同参数下的协同注入，可以提升 ECRH 系统的可用范围。图 2 为不同参数下不同频率微波的沉积位置，其中点划线为 68GHz 微波的沉积位置、实线为 105GHz 微波的沉积位置、虚线为 140GHz 微波的沉积位置。纵场在 1.0T-3.0T 范围内系统均可实现注入。

为了满足加热、电流驱动、辅助启动和 NTM 抑制的功能需求，系统规划了三套天线：中平面天线、上斜一号天线、上斜二号天线，三个天线位于装置弱场侧的同一扇段，其窗口所在装置的位置如图 3 所示，天线参数及其功能如表 1 所示。

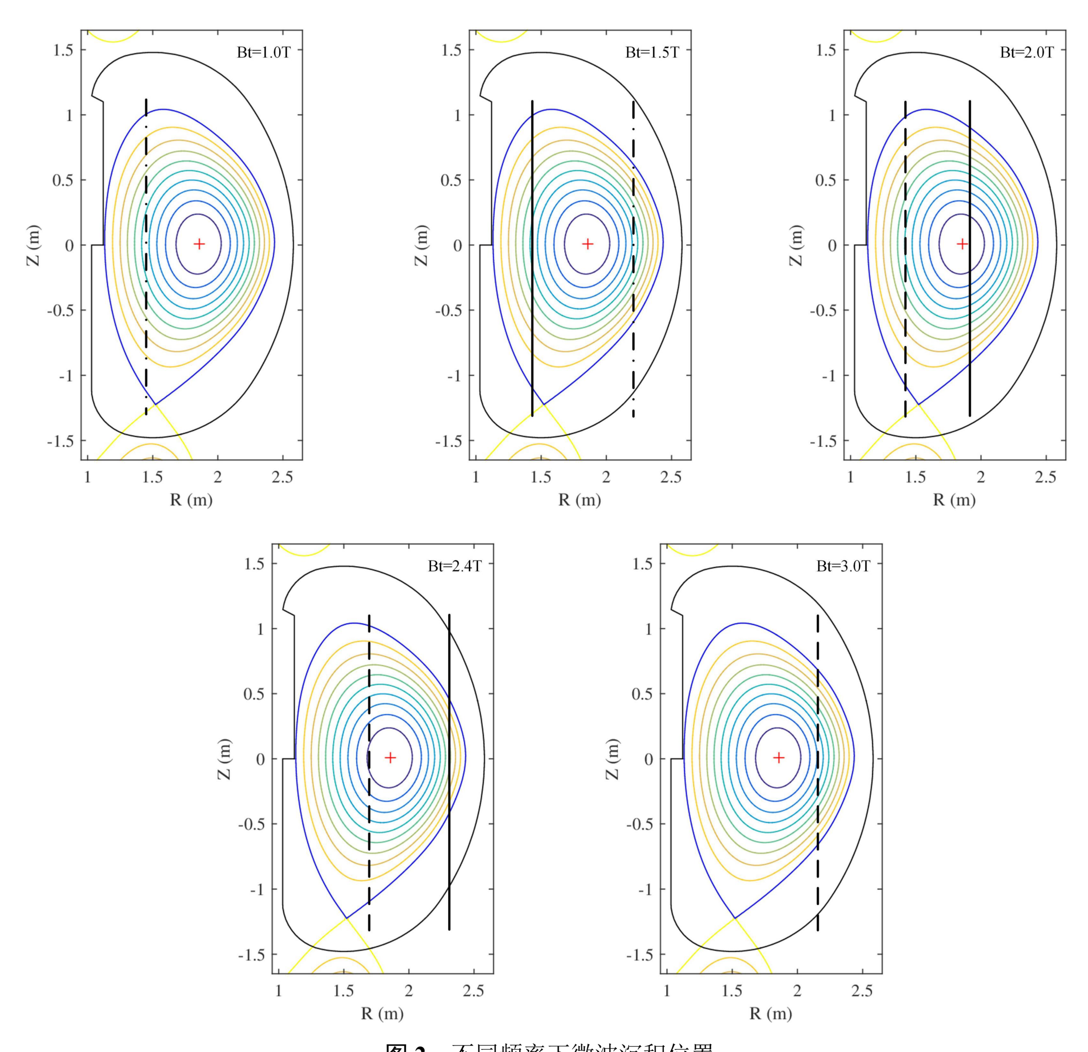


图 2 不同频率下微波沉积位置
Fig.2 Microwave deposition at different frequencies

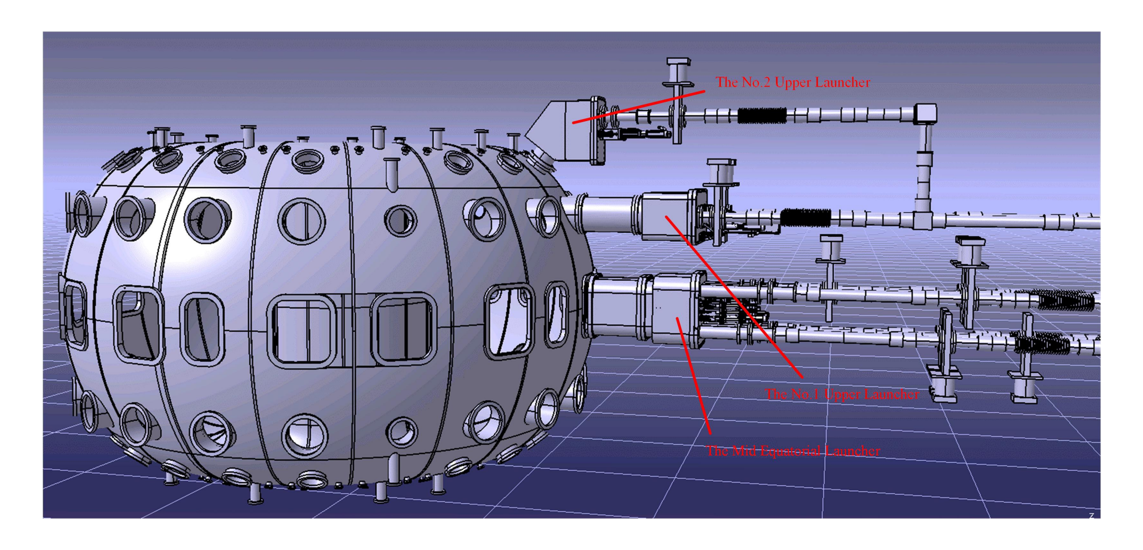


图 3 天线位置
Fig.3 Launcher position

表 1　天线参数及其功能
Table 1　The parameters and functions of the launcher

	中平面天线	一号上斜天线	二号上斜天线
窗口大小	450x500	Ø300	Ø200
布局	2x2	1x2	1x1
频率/GHz	68/105	105/140	105
功率容量/MW	0.5+3	2	1
脉冲宽度/s	1/3	3	3
注入角度/°	环向：-18.5~18.5 极向：-17~17	极向：-80~-15	极向：-82~-69
功能	加热，电流驱动，辅助启动，NTM 抑制	NTM 抑制	NTM 抑制

3　天线设计

3.1　中平面天线设计

中平面天线位于装置中平面窗口，能垂直注入等离子体，加热效率高，且空间较大，能同时注入多束微波，因此承担了天线系统主要的加热功能。中平面天线规划注入 4 束微波，最终设计布局为 2×2，安装 4 面聚焦镜，两面可控制注入方向的平面反射镜，左右两侧每两路微波共用一面反射镜，光路示意图如图 4 所示，图为侧视图。

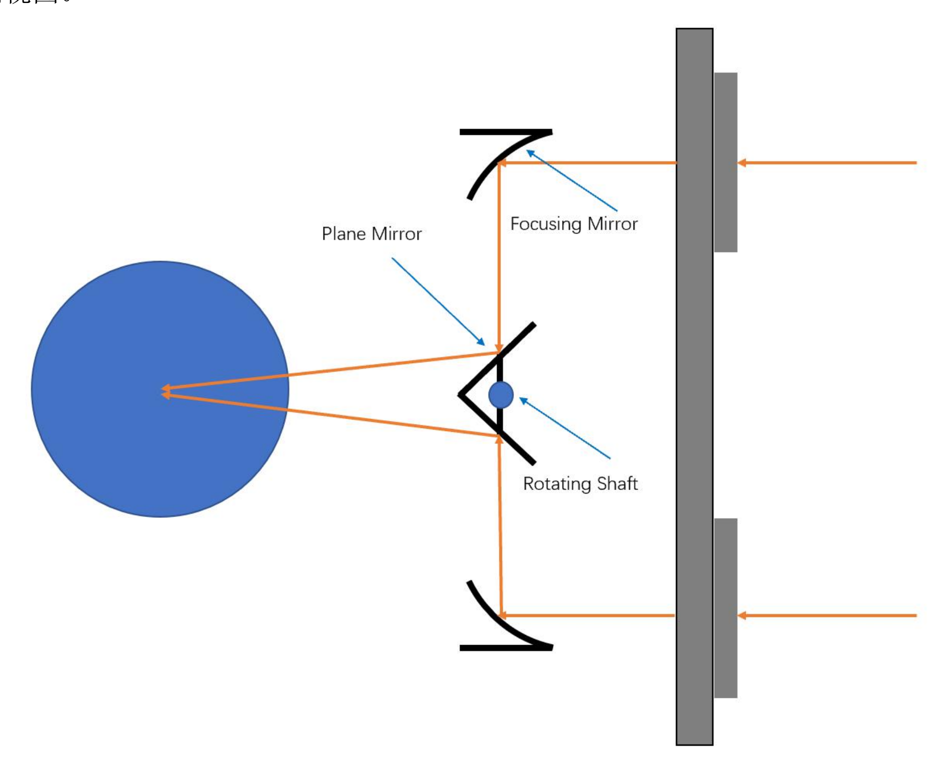


图 4　中平面天线光路示意图
Fig.4　Schematic diagram of the optical path of the mid equatorial launcher

两路微波共用一面反射镜和相应的驱动机构可大大节约有限的空间，但这也造成如图 4 所示反射镜极向置于 0 位置时微波实际的发射角不为零，经计算要使该位置注入的微波沉积在等离子体中心，该位置的 $z = 0.0596m$，$\theta = -3.803^{\circ}$。

3.2 上斜一号天线设计

上斜一号天线位于装置Ø300 窗口，窗口空间有限，该窗口距离等离子体较远，受等离子体影响很小，若将最后一面可转动的反射镜伸出窗口面向等离子体，该天线的注入角度就能覆盖较大的范围。上斜一号天线主要设计用于实时控制 NTM，对响应速度和转动精度要求很高[13.14]，最终设计为仅可极向旋转的结构，采用推杆的结构，使达到较高的转动精度。NTM 往往出现在高参数运行时，因此选择注入频率为 105GHz/140GHz 双频的两束微波，增加运行的参数范围。

上斜一号天线的主体结构主要包括真空密封箱、聚焦镜和平面镜、机械转动和传动系统。天线共有两路反射路径，每条反射路径上有一面聚焦镜，三面平面反射镜。上斜一号天线各反射镜及其转动机构的概念设计如图 5 所示：微波从上斜天线与波导连接的密封窗口初始入射到平面镜 M1，经反射到达聚焦镜 A1，微波通过聚集后，发射到平面镜 B 上，最后反射到平面镜 C1 上。通过推杆推动平面镜 C1 在极向的转动，实现不同极向发射角度下微波对于等离子体的注入。

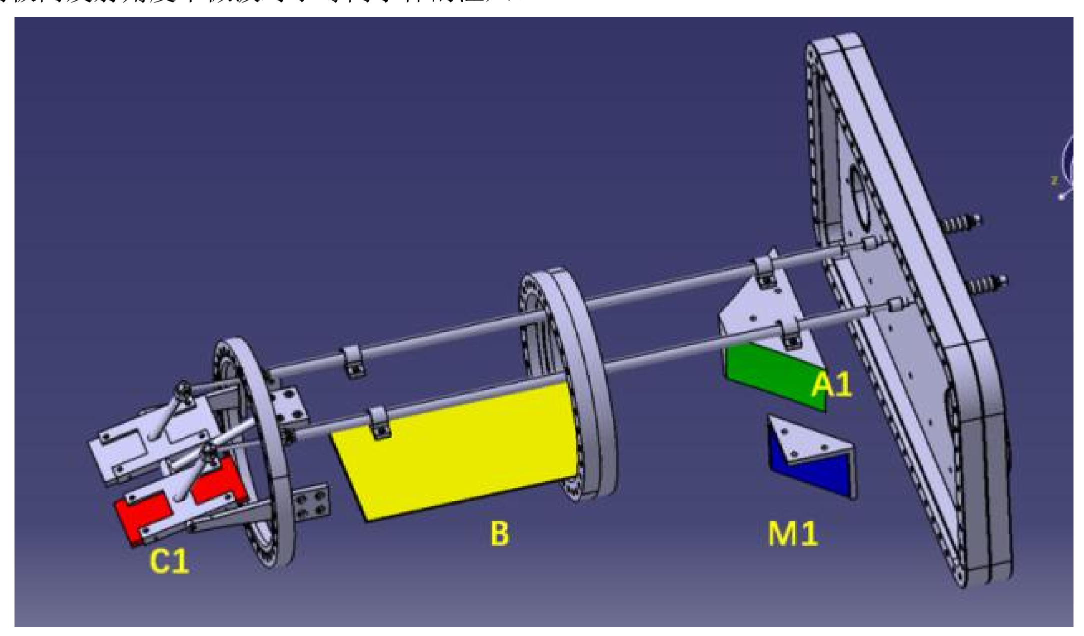


图 5　上斜一号天线概念设计图

Fig.5　Conceptual design drawing of the No. 1 upper launcher

聚焦镜设计的基本原则是将微波波束的束腰，尽可能放在等离子体中心区域，该原则可能带来在平面镜上的光斑过大，导致减小其有效转动区间的可能，上斜一号天线受空间限制最后一面平面反射镜面积较小，选择将束腰放在该镜面上尽可能降低衍射损耗。

3.3 上斜二号天线设计

由于上斜二号天线所在窗口的直径只有 200mm，同时 HL-3 装置上斜窗口周围的纵场、极向场线圈以及水冷、线排等状况复杂，在设计上斜二号天线时需要充分考虑周围的工况，因此真空密封箱尺寸有限。目前仅对该天线内部进行了光路设计。考虑到空间有限，同时上斜二号天线所在窗口距离等离子体较远，受等离子体影响很小，将最后一面可转动的反射镜伸出窗口面向等离子体，此时传动机构难以设计，故暂时只考虑极向方向的转动，后续可能在此基础上增加环向方向的转动，或根据需求重新进行反射光路设计。

上斜一号天线的极向入射范围几乎能覆盖整个等离子体，上斜二号天线空间有限，其主要目的为控制 NTM，故考虑满足发射范围覆盖磁岛出现的主要区域[15]。最终的光路设计如图 6 所示，其极向发射范围满足需求。上斜二号天线理论发射范围与其对应的最后一面反射镜的角度如表 2 所示，可以看出最后一面反射镜的角度变化很小，这对于发射角度的精确控制提出了很大的挑战，后续设计控制传动系统时需增加变化相同角度对应的电机丝杠距离。

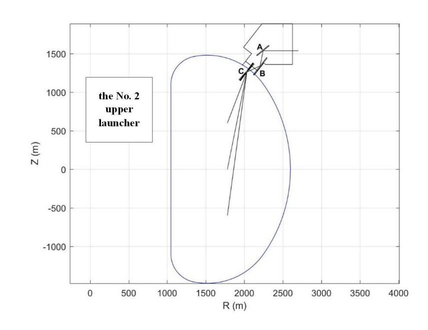


图 6 上斜二号天线光路设计

Fig.6 Optical path design of the No. 2 upper launcher

表 2 上斜二号天线理论发射范围

Table 2 Theoretical transmission range of the No. 2 upper launcher

	极向发射角度(°)	C 镜角度(°)
最小角度	-69	47.2
最大角度	-82	53.8

4 天线测试

4.1 中平面天线

中平面天线测试的内容主要包括发射角度范围的测试和极向方向转动速度的测试，因环向转动采用丝杠的结构和慢速电机，无需进行转动速度测试。

实际测试中，受屏蔽挡板的遮挡和装置壁厚以及窗口周围安装第一壁的限制，最终天线的极向发射角范围限制在-18°~18°，环向发射角范围限制在-18.5°~18.5°。极向方向的测试结果如图 7 所示，图 7(a)为左平面镜驱动电机间隔 50ms 从入射角度-18°到-18°来回移动 13.02mm 满量程的位置和速度随时间的变化，图 7(b)为右平面镜驱动电机间隔 50ms 从入射角度-18°到-18°来回移动 12.96mm 满量程的位置和速度随时间的变化。从图中可以看出，伺服驱动器给电机的移动位置命令和电机实际反馈的移动位置几乎重合，测试时电机的响应时间均小于 1ms，达到微秒量级，在同一个时间点，电机给定的命令位置与电机运行的实际位置之间的间隔全部小于 0.07mm。通过测定，左平面镜 13.02mm 满量程的最快运行时间为 79ms，右平面镜 12.96mm 满量程的最快运行时间为 87.75ms。

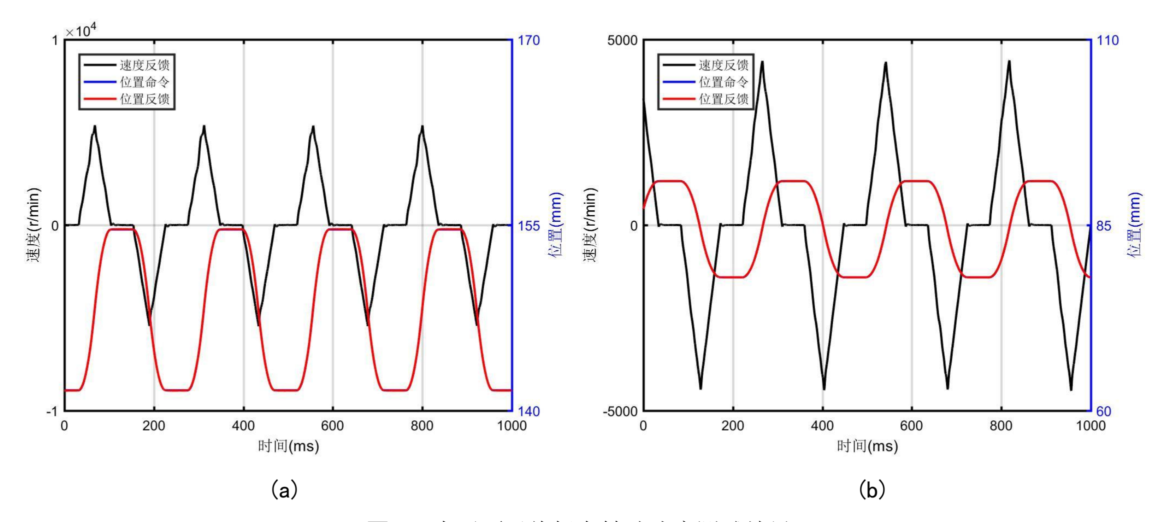


图 7 中平面天线极向转动速度测试结果

Fig.7 Test results of polar rotation speed of the mid equatorial launcher

4.2 上斜一号天线

上斜一号天线测试的内容主要包括发射角度范围的测试、极向方向转动速度的测试，以及天线转动角度和电机绝对位置关系的测试。上斜一号天线的设计发射角度范围为-15°~-80°，表 3 给出了实际测得的天线镜面发射的有效极向角度范围，可以看到，实际注入角度已满足理论设计的最大发射范围，完全满足实验需求，可以实现从等离子体边缘到中心点的加热。

表 3 上斜一号天线实测极向发射角度
Table 3 Measurement of polar transmission angle for the No. 2 upper launcher

	极向发射角度(°)	电机绝对位置(mm)	丝杠移动距离(mm)
左路	-15.00~-80.34	21.968~82.468	60.5
右路	-15.00~-80.26	-43.815~16.685	60.5

天线电机测试的目的主要是了解电机的响应时间、电机运行精度以及满量程运行时间是否能够达到系统的要求。图 8 为测试结果：图 8(a)为左平面镜驱动电机间隔 50ms 从入射角度-15°到-80°来回移动 60.14mm 满量程的位置和速度随时间的变化，图 8(b)为右平面镜驱动电机间隔 50ms 从入射角度-15°到-80°来回移动 60.275mm 满量程的位置和速度随时间的变化。从图中可以看出，伺服驱动器给电机的移动位置命令和电机实际反馈的移动位置几乎重合，测试时电机的响应时间均小于 1ms，达到微秒量级，在同一个时间点，电机给定的命令位置与电机运行的实际位置之间的间隔全部小于 0.045mm。通过测定，左平面镜 60.14mm 满量程的最快运行时间为 189.875ms，右平面镜 60.275mm 满量程的最快运行时间为 189.5ms。

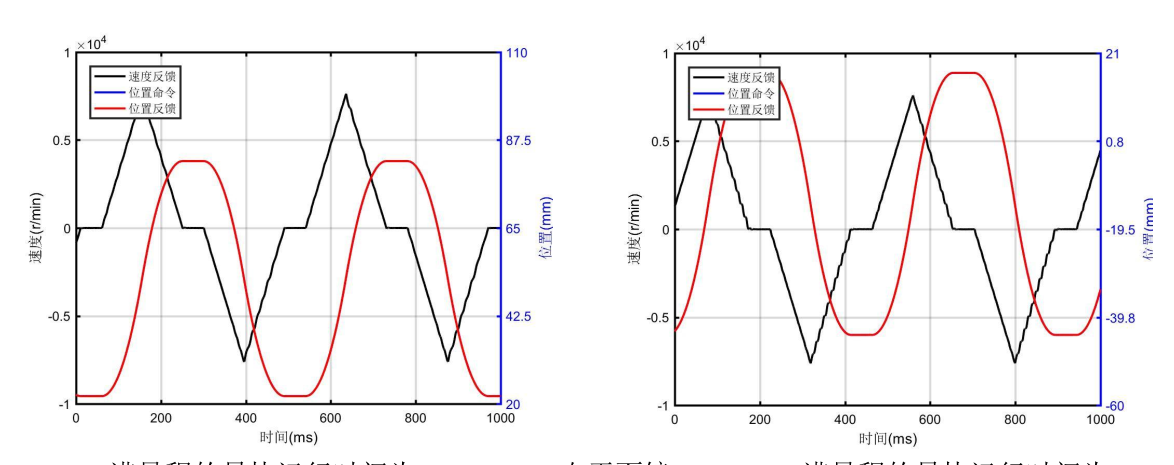


图 8 上斜一号天线极向转动速度测试结果
Fig.8 Test results of polar rotation speed of the No. 1 upper launcher

测试天线转动角度和电机绝对位置的关系，可以得到实际实验时控制所需的数据，即不同发射角度对应的电机位置。天线的测试方案是搭建光学实验平台，在平台上固定天线和激光光源，用伺服驱动器控制电机的转速和丝杠位置，用激光模拟入射的微波，测量激光通过天线出射后打在靶板上的位置，确定天线发射角度与电机转动距离的关系。

天线测试的最终结果如图 9 所示，图 9(a)为左边光路的测试和拟合结果，图 9(b)为右边光路的测试和拟合结果，可以看到，发射角度和电机位置有很好的线性关系，这有利于在实际实验过程中操纵天线的发射角度。

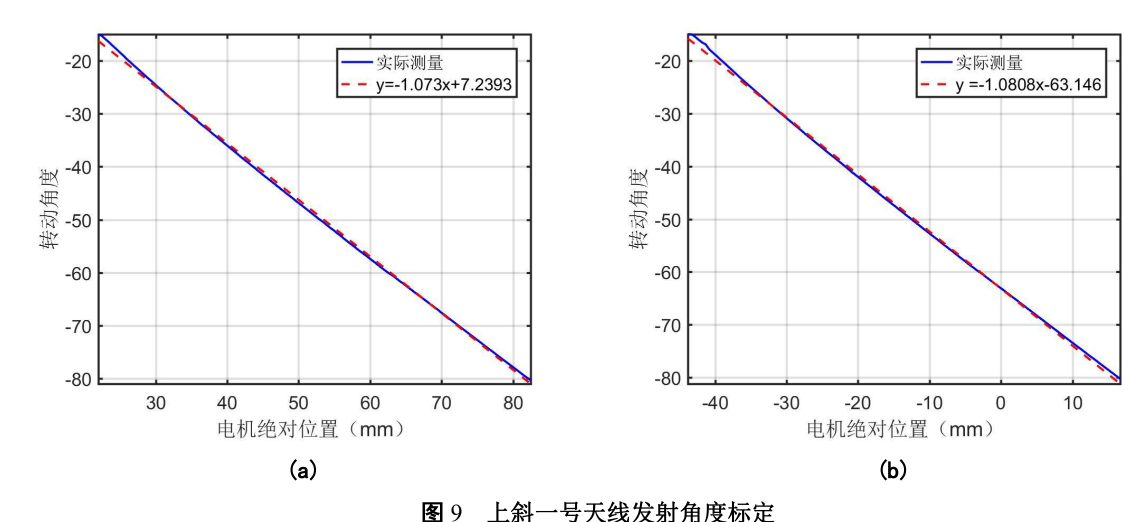


图 9 上斜一号天线发射角度标定

Fig.9 Calibration of the transmission angle of the No. 1 upper launcher

5 结语

根据 HL-3 装置电子回旋共振加热(ECRH)系统的需求，完成了天线系统的设计与研制，并对天线进行了测试与安装。完成了其中两个天线的设计、制造和测试，另外一个天线完成了发射光路的设计。结果表明，上斜二号天线的光路设计达到了系统的需求；中平面天线和上斜一号天线控制精确、快速，达到了装置实验使用的要求。

致谢 感谢 HL-3 装置 ECRH 团队成员的帮助，同时感谢 103 室的技术人员协助天线的检漏和安装。

作者贡献说明 郑万欣完成了天线的理论设计，参与了天线的测试与安装，处理了数据，并写作了本论文；叶即若参与了天线的测试与安装；陈罡宇完成了天线的机械设计与制图；黄梅参与了天线的系统设计，修改了论文。

参考文献

1 Erckmann V, Gasparino U. Electron cyclotron resonance heating and current drive in toroidal fusion plasmas[J]. Plasma Physics & Controlled Fusion, 1994, 36(12):1869. DOI:10.1088/0741-3335/36/12/001.

2 Prater R. Heating and current drive by electron cyclotron waves[J]. Physics of Plasmas, 2004, 11(5):2349-2376. DOI:10.1063/1.1690762.

3 Wesson J A. Tokamaks[M]. Oxford: Clarendon Press, 2004.

4 Maraschek M. Control of neoclassical tearing modes[J]. Nuclear fusion, 2012, 52(7):p.074007.1-074007.17. DOI:10.1088/0029-5515/52/7/074007.

5 Chapman I T, Haye R J L, Buttery R J, et al. Sawtooth control using electron cyclotron current drive in ITER demonstration plasmas in DIII-D[J]. Nuclear Fusion, 2012, 52(6):063006.DOI:10.1088/0029-5515/52/6/063006.

6 Kobayashi T, Kajiwara K, Oda Y, et al. Development of two directional beam steering ECH/CD launcher for JT-60SA[J]. Fusion Engineering and Design, 2019, 146(Sep.):1647-1651.DOI:10.1016/j.fusengdes.2019.03.008.

7 Avelino Mas Sánchez, René Chavan, Gagliardi M, et al. Design status of the double Closure Plate Sub-Plate concept for the ITER Electron Cyclotron Upper Launcher[J].Fusion Engineering & Design, 2018, 136(PT.A):503-508. DOI:10.1016/j.fusengdes.2018.03.006.

8 HUANG Mei, RAO Jun, SONG Shaodong, et al. Design and Research of Electron Cyclotron Resonance Heating and Current Dive System on HL-2M Tokamak[J]. The European Physical Journal Conferences, 2017, 147:04006. DOI:10.1051/epjconf/201714704006.

9 袁保山,姜韶风,陆志鸿.托卡马克装置工程基础[M].原子能出版社,2011.
YUAN Baoshan, JIANG Shaofeng, LU Zhihong. Fundamentals of Tokamak Device Engineering[M]. Atomic Energy Press, 2011

10 Li Qiang. The component development status of HL-2M tokamak [J]. Fusion Engineering and Design, 2015, 96-97: 338-342. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.06.106

11 XUE L, Garcia J, ZHENG G, et al. Integrated plasma scenario analysis for HL-2M tokamak[J]. Nuclear Fusion, 2019, 60(1).DOI:10.1088/1741-4326/ab4c65.

12 黄梅, 王贺, 张峰,等. HL-2M 装置电子回旋共振加热及电流驱动系统设计与研制进展[J]. 核聚变与等离子体物理, 2021, 41(S02):5. DOI: 10.16568/j .0254-6086.2021 s2012.
HUANG Mei, WANG He, ZHANG Feng, et al. Design and development of ECRH/ECCD system on HL-2M tokamak[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2021, 41 (S02): 5 DOI: 10.16568/j.0254-6086.2021 s2012

13 Takahashi K, Kobayashi N, Abe G, et al. Development of a direct mirror angle detector for ITER EC launchers[J]. Fusion Engineering and Design,2017,123. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.04.114

14 严龙文,季小全,宋绍栋,等. HL-2A 装置撕裂模实时控制的实验研究[C]. 全国等离子体科学技术会议.2017.
YAN Longwen, JI Xiaoquan, SONG Shaodong, et al. Experimental study on real-time control of tearing mode in HL-2A tokamak[C]. National Conference on Plasma Science and Technology, 2017.

15 Bardoczi L, Choi M J, Navarro A B, et al. Controlled neoclassical tearing mode (NTM) healing by fueling pellets and its impact on electron cyclotron current drive requirements for complete NTM stabilization[J]. Nuclear fusion, 2019, 59(12):126047.1-126047.14.DOI:10.1088/1741-4326/ab472d.